

文章编号 1004-924X(2025)15-2365-13

HRB400 钢筋金纳米复合材料光声传感微裂纹检测

孙雨梦, 孙子惠, 杜 聪*, 陈志刚, 孙殷楠
(北京建筑大学 机电与车辆工程学院, 北京 102616)

摘要:为解决传统检测方法抗电磁干扰弱、复杂工况适应性差的问题,针对高铁轨枕 HRB400 钢筋微裂纹高精度检测的需求,开发了一种基于金纳米复合材料(Au-PDMS)光声传感的超声检测方法。首先,探究光声转换理论模型,制备 4.01 wt%, 5.23 wt%, 6.01 wt%, 7.69 wt% 浓度梯度 Au-PDMS 薄膜样品;然后,采用 532 nm 脉冲激光激发超声信号,结合巴特沃斯带通滤波与 db4 小波分解复合算法处理数据;最终通过 COMSOL Multiphysics 搭建 HRB400 钢筋有限元模型,分析超声信号多维度特征与裂纹深度定量关系。本研究分析采用 5.23 wt% 浓度样品的超声主频达 4.58 MHz、信噪比 19.56 dB;实测裂纹深度检测精度 640 μm 。定量研究表明:裂纹深度为 1 mm 时首波幅值提升;深度 3 mm 时波形分裂为双峰结构,峰间隔达 1.50 μs ;通过建立裂纹深度与峰值幅度、能量、主频率及到达时间的多参数协同响应模型,实现 HRB400 钢筋微裂纹量化检测。该系统兼具微米级分辨率、强抗电磁干扰性和复杂工况适应性,为高铁基础设施结构健康监测提供可靠的技术支撑。

关键词:光声传感;超声检测;HRB400 钢筋;多物理场仿真;微裂纹生长

中图分类号:TB559;TG115.28 **文献标识码:**A

doi:10.37188/OPE.20253315.2365 **CSTR:**32169.14.OPE.20253315.2365

Crack detection of HRB400 steel reinforcement bar using AuNPs-based nanocomposites photoacoustic sensing

SUN Yumeng, SUN Zihui, DU Cong*, CHEN Zhigang, SUN Yinnan

(School of Mechanical-electronic and Vehicle Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 102616, China)

* Corresponding author, E-mail: ducong@bucea.edu.cn

Abstract: To overcome the limited electromagnetic-interference resilience and poor adaptability of conventional approaches, an ultrasonic detection method based on AuNPs-reinforced nanocomposite photoacoustic sensing was developed for high-precision microcrack detection in HRB400 steel reinforcement bars used in high-speed rail sleepers. Au-PDMS films with Au nanoparticle concentrations of 4.01 wt%, 5.23 wt%, 6.01 wt%, and 7.69 wt% were fabricated, and their photoacoustic conversion characteristics were characterized. Ultrasonic signals were generated by a 532 nm pulsed laser and processed using a hybrid algorithm combining Butterworth bandpass filtering and db4 wavelet decomposition. A finite-element model of HRB400 reinforcement was constructed in COMSOL Multiphysics to quantify the relationship between multidimensional ultrasonic features and crack depth. Experimental results indicate that the 5.23 wt% Au-

收稿日期:2025-06-07;修订日期:2025-07-18.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 62205012)

PDMS sample exhibited a dominant frequency of 4.58 MHz and a signal-to-noise ratio of 19.56 dB, achieving a measured crack-depth detection resolution of 640 μm . Quantitative analysis showed an increase in first-wave amplitude for 1 mm deep cracks, whereas 3 mm deep cracks produced waveform splitting into a dual-peak structure with a peak interval of 1.50 μs . A multiparameter synergistic response model integrating peak amplitude, energy, dominant frequency, and time-of-arrival enabled quantitative microcrack assessment. The proposed system provides micron-level resolution, strong immunity to electromagnetic interference, and adaptability to complex environments, offering reliable technical support for structural health monitoring of high-speed rail infrastructure.

Key words: photoacoustic sensing; ultrasonic detection; HRB400 steel reinforcement bar; multiphysics field simulation; microcrack growth

1 引 言

铁路安全始终是发展的关键,铁路事故主要包括人为因素、轨道沉降和路基失效、设备和信号故障等。其中,轨道沉降和路基失效导致的事故造成每年约 8 400 万美元经济损失,占事故总数的 22.6%^[1]。作为现代交通体系核心组成部分,高速铁路基础设施已建立严苛的安全保障体系以确保运输网络可靠性^[2]。在高铁基础设施关键构件中,钢筋混凝土枕木承担时速高达 350 公里每小时的列车连续运行产生的长期动态荷载。在长期循环重载载荷、极端环境侵蚀及潜在制造缺陷等多重因素影响下,枕木内部钢筋极易产生微裂纹。微裂纹会加速腐蚀介质传输,从而加剧钢筋锈蚀致使混凝土强度下降,最终引发灾难性结构失效,危及日益增长客货运输安全^[3]。因此,研究高精度钢筋裂纹检测技术已成为保障铁路客运安全的迫切需求。

目前,传统钢筋裂纹无损检测(Non Destruction Testing, NDT)方法主要包括 X 射线检测、涡流检测、红外热成像技术、声发射技术以及超声检测等。Fang 等^[4]采用 X 射线微计算机断层扫描方法,分析钢筋混凝土中钢筋腐蚀诱发裂缝的腐蚀特征,开发一种缓蚀效率测量新技术,实现腐蚀行为预测。Kobayashi Chihiro 等^[5]利用太赫兹 (THz) 和亚太赫兹 (sub-THz) 波,开发一种新型非接触式无损检测方法,用于评估钢筋混凝土结构内部劣化。Elseicy 等^[6]系统评估 GPR 与伽马射线、脉冲回波等其他无损检测技术在道路结构中协同应用。结合钢筋探伤仪测量钢筋直径及覆盖层厚度,通过多技术融合提升检测可

靠性。

然而,传统无损检测方法普遍存在高成本、安全风险、环境敏感、信号干扰、数据处理复杂等局限性。这些方法在高铁枕木钢筋裂纹检测中,往往因穿透性不足、抗干扰能力弱或量化困难而难以满足精准检测需求。相比之下,超声检测技术凭借其穿透性强、安全性高、环境适应性强等优势,为解决这一难题提供新的技术路径。Kuchipudi 等^[7]提出一种基于超声剪切波成像的钢筋锈蚀检测方法,用于评估混凝土结构中钢筋腐蚀程度。通过合成孔径聚焦技术重建次表层图像,并结合 k-means 聚类分析,实现对加速腐蚀环境下钢筋劣化过程监测和腐蚀程度分类。Sun 等^[8]开发基于超声波检测结构健康监测系统,通过加速腐蚀装置模拟钢筋锈蚀过程,结合声发射技术定位裂纹扩展路径,用于评估钢筋混凝土结构损伤。Wang 等^[9]开发一种非接触式、高精度激光超声检测技术,用于识别 H62 黄铜薄板在制造过程中产生的表面缺陷。采用激光脉冲激发兰姆波,结合全光纤激光外差干涉仪测量超声信号,并通过 COMSOL Multiphysics 建立三维模型模拟兰姆波在铜板中的传播特性,优化检测参数。验证激光超声技术可用于薄铜板远程非接触式缺陷检测。后续研究中针对黄铜薄板性能和行为受成分浓度及缺陷影响问题,提出一种集成激光诱导击穿光谱与激光超声兰姆波系统方法^[10]。使用两个不同强度激光脉冲,分别实现主要元素的无校准 LIBS 定量分析和微量元素的定性检测,同时激发出强激光超声波信号,实现制造过程中对 H62 黄铜薄板元素浓度识别与缺陷精准定位。此外,超声检测可实现钢筋混凝土的抗压

强度、弹性模量和厚度等特性评估^[11]。超声检测对表面耦合条件有一定工作条件要求,其表面粗糙度直接影响监测灵敏度与精度^[12]。对于复杂多层钢筋铺排结构,超声检测结果可能受到回波噪声及结构噪声干扰,需要结合其他检测方法进行综合分析^[13],限制其在复杂工程环境中的应用。

近年来,光纤传感技术因其抗电磁干扰、耐腐蚀、可分布式测量等优势,在结构健康监测领域展现出巨大潜力。特别是基于纳米复合材料光纤传感器,通过局域表面等离子体共振(Localized Surface Plasmon Resonance, LSPR)效应或光声转换机制,能够高效激发和接收超声信号,对目标区域进行检测。Bao等^[14]综述光纤超声传感器研究进展,指出其在结构健康监测、无损检测和医学成像中的广泛应用。Concilio等^[15]提出一种复合材料结构中连接监测系统,提出采用分布式光纤传感技术进行持续监测,验证分布式光纤传感技术在粘接缺陷存在时应变信息。Dang等^[16]提出一种基于光纤布拉格光栅阵列轨道缺陷检测系统,结合超声波检测技术和非线性自回归神经网络,实现钢轨损伤智能识别与评估。Chen等^[17]提出一种基于分布式光纤传感和有限元分析的点蚀定量监测方法。该方法利用高空间分辨率光纤传感器测量受拉钢筋的应变分布,结合有限元模拟分析不同腐蚀坑形态的影响,实现点蚀位置、长度及程度定量评估。Tang等^[18]利用主动式全光光声超声系统产生并接收超声波,测量温度和检测钢棒裂缝,实现钢棒温度、检测和量化裂纹方法。Du等^[19-20]提出一种基于全光光声转换机制的集成化换能器,通过金纳米复合材料(Au-PDMS)光热-声耦合效应和法布里-珀罗干涉传感技术,实现高灵敏度的超声发射与接收一体化设计。

本文研发一套基于金纳米复合材料的光纤超声检测系统,以高铁轨枕所采用HRB400钢筋为例,进行表面微裂纹检测研究。光声传感材料由四氯金酸三水合物($\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$)与聚二甲基硅氧烷(Polydimethylsiloxane, PDMS)制备金纳米复合材料(Au-PDMS)。该系统通过光纤传输光信号规避电磁干扰,适用于易燃、强电磁干扰等恶劣工况,为钢筋微裂监测提供新方法。

2 Au-PDMS 复合材料光声转化机理

2.1 热弹膨胀与压力波形成

当激光能量低于固体材料损伤阈值时,激光入射到固体表面无熔融、气化发生。固体材料吸收激光能量并转换为热能,辐照区域附近产生局部迅速温升,引起热膨胀从而产生超声波信号,即热弹效应。

对于均匀各向同性材料,假设激光光束为高斯分布,考虑到对称性,采用柱坐标系,且不考虑热力学参数随着温度变化,则经典热传导方程可表示为:

$$\frac{\partial}{\partial t}[\rho C_p T(r, z, t)] = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[rk \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial z} \right] + Q(r, z, t), \quad (1)$$

其中: $T(r, z, t)$ 表示固体中温升分布变化, r 表示径向坐标, z 表示轴向坐标, t 表示时间变量。 k 表示热导率, Q 表示热源, ρ 表示材料密度, C_p 为定压比热容,在激光辐照固体材料时, $Q(r, z, t)$ 可表示为:

$$Q(r, z, t) = \gamma(1 - R) \cdot I_0 \cdot e^{-\gamma z} \cdot H(r) \cdot G(t), \quad (2)$$

其中: γ 表示介质光吸收系数, R 表示介质反射率, I_0 表示入射光斑中心处最大功率密度; $H(r)$ 和 $G(t)$ 分别表示激光脉冲的空间和时间分布,假设为:

$$H(r) = \exp\left(-\frac{r^2}{r_0^2}\right), \quad (3)$$

$$G(t) = \frac{t}{t_0} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad (4)$$

式中: r_0 表示激光光斑半径, τ 表示激光脉冲宽度。在激光激励瞬态热弹耦合过程中,温度场演化机制可由如下广义热传导方程描述:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q + \beta T_0 \frac{\partial \epsilon_{kk}}{\partial t}, \quad (5)$$

其中: $\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}$ 表征材料单位体积内热能随时间变化率,其中 ρ 为密度, C_p 为定压比热容。 $\nabla \cdot (k \nabla T)$ 描述热传导引起能量传输过程, k 为热导率。 $\beta T_0 \frac{\partial \epsilon_{kk}}{\partial t}$ 为应变率修正项,其中 $\beta = 3K\alpha_T$ 为热应力系数, K 为体积模量, α_T 为热膨胀系数,

$\epsilon_{kk} = \nabla \cdot \mathbf{u}$ 为体积应变。此项揭示动态应变率对温度场反向调制机制:材料因热膨胀产生的体积应变率 $\frac{\partial \epsilon_{kk}}{\partial t}$ 会通过热弹耦合效应形成等效热源,显著改变瞬态温场分布。由于温升不均匀在材料的内部会产生应力、应变,即由热弹效应激发出瞬态位移场,最终机械振动产生超声波。

2.2 光声信号转化效能

光声转换效率是评估 Au-PDMS 性能关键指标之一。高效光声转换不仅能够提升光声无损检测质量,还能增强缺陷识别能力。光声转化是通过激光脉冲能量激发金纳米复合材料塑性变形产生超声波,金纳米颗粒量子限域效应与 LSPR 对光声转换会有协同增强机制^[21],推导超声波的初始压力方程为:

$$P_0(\mathbf{r}) = \frac{\beta T(\mathbf{r})}{\kappa} \cdot \left[1 + \frac{\tau_p}{\tau_{th}} \left(\frac{\alpha_s}{\alpha_q} + 0.18 \frac{d}{\lambda_{LSP}} \right) \right], \quad (6)$$

式中: P_0 为超声波初始压力, κ 代表材料等温压缩系数, β 代表体积膨胀系数。特征热弛豫时间 $\tau_{th} = d^2/4\kappa$ 量化纳米颗粒的瞬态热响应。量子效率比 $\alpha_s/\alpha_q = 0.63$, α_s 为表面态吸收系数, α_q 为量子隧穿系数,反映纳米颗粒界面处载流子输运非经典行为。等离子体共振波长 λ_{LSP} 与颗粒直径 d 满足尺寸依赖关系:

$$\lambda_{LSP} = 520 + 1.2(d - 15). \quad (7)$$

设 T 为材料温度变化值,则可代入表达得出光吸收函数:

$$T = \frac{\mu_a F(\mathbf{r})}{\rho C_V}, \quad (8)$$

式中: ρ 为材料密度, C_V 为恒定压力下材料比热容, $F(\mathbf{r})$ 为激光光通量, μ_a 为金纳米颗粒光学吸收系数。

结合以上公式,则可得超声波初始压力方程:

$$P_0(\mathbf{r}) = \frac{\beta \mu_a F(\mathbf{r})}{\kappa \rho C_V} \cdot \left[1 + \frac{\tau_p}{\tau_{th}} \left(\frac{\alpha_s}{\alpha_q} + 0.18 \frac{d}{\lambda_{LSP}} \right) \right] = \Gamma \mu_a F(\mathbf{r}), \quad (9)$$

其中: $\Gamma(\mathbf{r}) = \frac{\beta}{\kappa \rho C_V}$ 为格律乃森参数,在超声波

初始压力确定后,超声波脉冲能量为:

$$E_u \cong \frac{c}{B} A \int_0^\infty P_0^2(\mathbf{r}) dt, \quad (10)$$

式中: c 为超声波在介质中传播速率, B 为介质弹性模量, A 为激光辐射区域。最终可得出光声转化率 η 为:

$$\eta = \frac{E_u}{E_L}, \quad (11)$$

式中 E_L 为激光脉冲能量。为避免能量过大造成材料破坏,激光功率被严格控制在烧蚀阈值以下。

2.3 钢筋表面超声传播特性

超声波在钢筋表面以瑞利波形式传播。由于瑞利波质点运动轨迹为椭圆振动,其位移可分解为面内(水平方向)和面外(垂直方向)分量。对于在半空间中传播瑞利波,面外和面内位移可以表示为^[22]:

$$\begin{cases} U_r(\omega, r) = U_0(\omega) \left[e^{-\gamma_1 r} - \frac{2k_R^2}{k_R^2 + \gamma_2^2} e^{-\gamma_2 r} \right] \\ U_z(\omega, r) = U_0(\omega) k_R \left[e^{-\gamma_1 r} - \frac{2\sqrt{2}}{k_R^2 + \gamma_2^2} e^{-\gamma_2 r} \right] \end{cases}, \quad (12)$$

其中: $\gamma_1 = \sqrt{k_R^2 - k_1^2}$, $\gamma_2 = \sqrt{k_R^2 - k_2^2}$, k_1 和 k_2 分别为纵波和横波波数。在实际工程应用中, HRB400 钢筋表面存在周期性横肋与纵肋,其几何非理想性显著改变瑞利波传播边界条件。表面肋纹作为周期性障碍物,引发能量散射与耗散,还导致瑞利波在传播过程中产生附加能量损失。与此同时,表面结构扰动进一步增强瑞利波色散特性,使其频率依赖性更加显著。本研究在理想光滑圆棒模型基础上引入肋纹引起扰动项,横肋周期性凸起等效为表面阻抗调制,引入衰减因子 $\alpha(\omega)$:

$$U_0(\omega) \rightarrow U_0(\omega) \cdot e^{-\alpha(\omega)z}, \quad (13)$$

其中: $\alpha(\omega) = \beta \cdot \frac{h}{\lambda_R} \cdot \sqrt{\omega}$, β 为肋高 h 与波长 λ_R 的比值系数。肋纹导致有效波数 k'_R 变化:

$$k'_R = k_R \left[1 + \eta \cdot \left(\frac{d}{\lambda_R} \right) \sin \left(\frac{2\pi z}{P} \right) \right], \quad (14)$$

其中: D 为横肋间距, P 为螺旋周期, η 为经验系数(约 0.05~0.1)。HRB400 钢筋的肋纹加剧瑞利

波的色散特性,相速度 c_{ph} 修正为:

$$c_{ph}(\omega)=c_{R0}\left[1-\zeta\cdot\frac{h^2\omega^2}{c_{R0}^2}\right],\tag{15}$$

其中: c_{R0} 为光滑圆棒瑞利波速, ζ 为肋纹几何参数相关因子。

3 Au-PDMS 复合材料全光光声系统

3.1 Au-PDMS 复合材料制备

本研究采用一锅法合成工艺制备四种不同金纳米颗粒掺杂浓度的 Au-PDMS 复合材料,浓度梯度为 A_1 :4.01 wt%, A_2 :5.23 wt%, A_3 :6.01 wt%, A_4 :7.69 wt%。具体工艺流程如下:

- (1) 将 PDMS (Sylgard 184, Dowcorning) 主剂与固化剂按照 10:3 精确质量比进行充分混合,静置脱泡备用;
- (2) 称取纯度 99.9% 的 $\text{HAuCl}_4\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 进行精细研磨处理,并将其均匀分散于 PDMS 基质中;
- (3) 在 60 °C 恒温条件下持续搅拌 5 分钟以确保金盐充分分散,形成 HAuCl_4 与 PDMS 混合物;
- (4) 采用低温超声辅助还原工艺,对混合物进行超声水浴处理,设置超声功率为 500 W,工作频率为 20 kHz,处理时间 40 min;
- (5) 为消除超声过程中产生的微气泡干扰,对混合物实施多级真空处理,真空度控制在 -0.095 MPa ,采用 3 次 30 min 循环真空操作。

经过上述工艺处理,最终获得如图 1 所示 4 种浓度的深紫色 Au-PDMS 复合材料。实验过程中详细记录各浓度 Au-PDMS 复合材料的成分参数,如表 1 所示。



图 1 Au-PDMS 复合材料

Fig. 1 Au-PDMS composites

表 1 Au-PDMS 复合材料成分参数

Tab. 1 Compositional parameters of Au-PDMS nano-composites

样本 编号	质量比/ wt%	总质量/ g	金盐 /g	主剂/ g	固化 剂/g
A_1	4.01	5.02	0.19	3.72	1.11
A_2	5.23	5.16	0.26	3.77	1.13
A_3	6.01	5.93	0.34	4.30	1.29
A_4	7.69	4.99	0.36	3.56	1.07

3.2 Au-PDMS 复合材料薄膜样本制备

- (1) 基底预处理:选用 4 片标准载玻片作为基底,放入装有丙酮溶液的超声波清洗机中清洗 10 分钟,以去除表面杂质。将载玻片放入电热恒温干燥箱设置温度 100 °C,烘干直至载玻片干燥。
- (2) 涂覆材料:将 0.35 mL $A_1\sim A_4$ 浓度 Au-PDMS 复合材料分别均匀涂覆于基底表面。
- (3) 热处理:首先将样品置于 90 °C 恒温加热平台加热 1 h,有效控制材料内部水分的梯度挥发,防止因快速蒸发导致表面微孔结构形成。随后将温度梯度升至 160 °C 进行 3 h 热固化处理,确保 Au-PDMS 复合材料实现完全交联固化。

图 2 为在扫描电子显微镜 (FEI050T, NCS) 尺度下观察到 $A_1\sim A_4$ 浓度 Au-PDMS 复合材料薄膜样本。

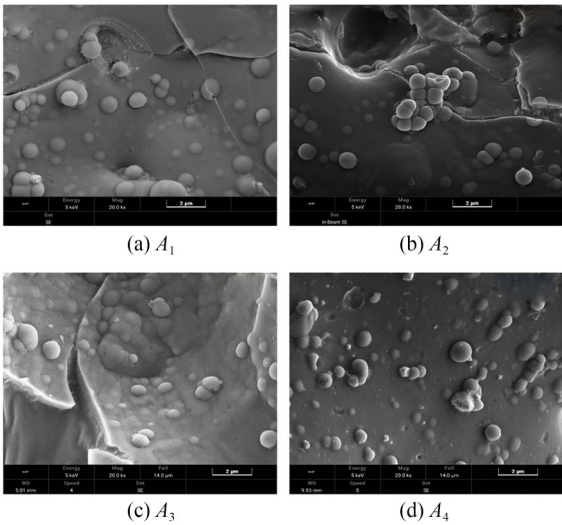


图 2 扫描电镜下 Au-PDMS 复合材料薄膜样本

Fig. 2 SEM samples of Au-PDMS nanocomposite film

3.3 全光光声系统搭建

Au-PDMS 复合材料激光超声信号激发实验

系统如图 3 所示。实验采用 532 nm 固态脉冲激光源 (DPS-532-BS-D-20MJ), 在 10 Hz 频率和 105 A 电流条件下进行实验。激光通过 400 μm 多模光纤进行耦合传输, 最终到达平面模式样本激发区域。激光输出端采用高精度三维可调夹具定位, 确保光纤端面与 Au-PDMS 薄膜样本保持 2 mm 间距。为捕获超声信号, 在样品同侧布置宽带水听器 (PA-NH0200), 水听器与激光激发点水平距离 1.8 mm, 其接收面与样品平面呈 70° 夹角以实现信号接收。超声信号时域波形及频谱特征由高速数据采集系统实时采集, 并通过专用上位机软件进行可视化处理与存储。本实验采用重复超声激发方案, 累计采集 10 000 个离散采样点数据样本, 每个采样点数据平均 100 次, 确保测量数据的可靠性和重复性。

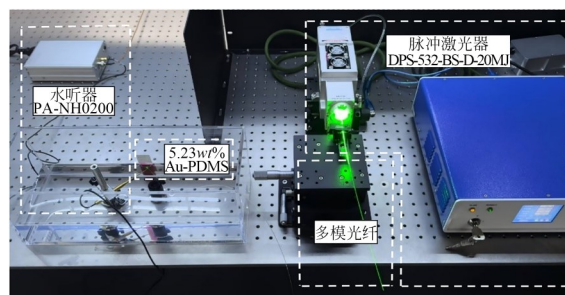


图 3 全光光声系统

Fig. 3 All-optical photoacoustic system

3.4 光声信号处理及特征分析

对 $A_1 \sim A_4$ 样本进行激光超声实验, 并对所得超声信号进行分析, 以获得各个信号具体参数并计算距离分辨率。通过对比研究, 选择最优超声信号作为钢筋微裂纹无损检测初始超声信号。

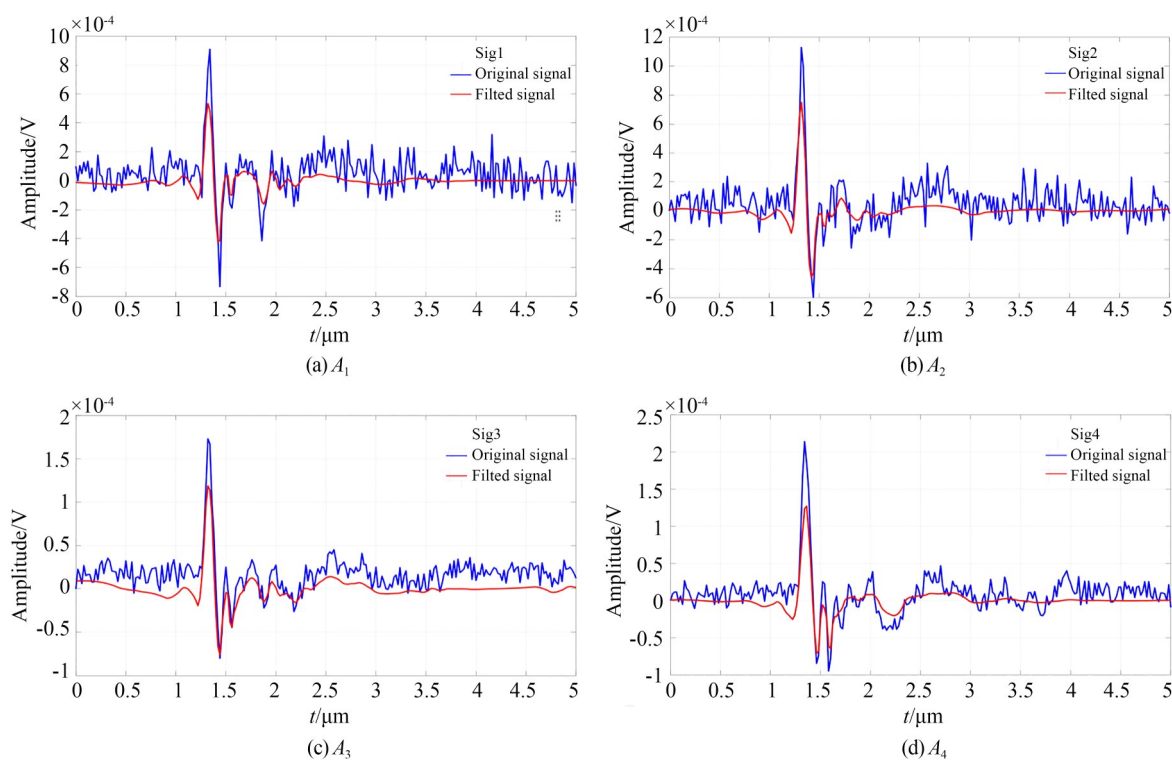


图 4 Au-PDMS 复合材料薄膜样本超声波时域振幅

Fig. 4 Ultrasonic waves time domain amplitudes of Au-PDMS nanocomposite film samples with concentrations

滤波作为信号处理核心环节, 其本质在于从原始超声信号中精准剥离噪声干扰, 同时最大限度保留有效信息。本文融合巴特沃斯带通滤波与 db4 小波分解复合去噪算法, 以实现超声信号

高保真降噪处理。图 4 为 Sig1-Sig4 滤波前后时域波形对比。实验选取 4 组超声信号 (Sig1-Sig4) 依据其频谱特性, 构建 0.5~10 MHz 四阶巴特沃斯带通滤波器, 有效滤除低频基线漂移及

高频随机噪声,确保超声信号主频成分完整性。采用db4小波基对预处理信号进行五层多分辨率分解,并基于软阈值优化策略对小波系数进行自适应修正,进一步抑制残余噪声。保留关键时域特征及形态学信息,为后续分析提供高信噪比数据基础。

在本研究中,选择最适合钢筋无损检测超声信号,对Sig1~Sig4进行多维度信号属性分析。首先,分析信号最大幅值、最小幅值、峰峰值反映信号特征参数,采用峰值检测算法,在绝对值信号中以30%最大幅值为阈值,且相邻峰值间隔不少于100个采样点,自动识别主要回

波。其次进行频域特征分析,提取主频,并分析能量累积分布从10%到90%对应频率区间带宽范围,记录能量分布上下限频率。通过频谱参数,分析不同浓度样品对超声信号频率成分影响。然后对信噪比与统计特征分析,本实验设置前10%采样点为噪声采样区域,分别分析噪声区和全信号方差,据此估算信噪比。最后进行包络与时频分析,采用希尔伯特变换获得信号包络,分析信号能量时域分布特征。进一步利用短时傅里叶变换(Short-Time Fourier Frangform, STFT),对信号进行时频分析,如图5所示。

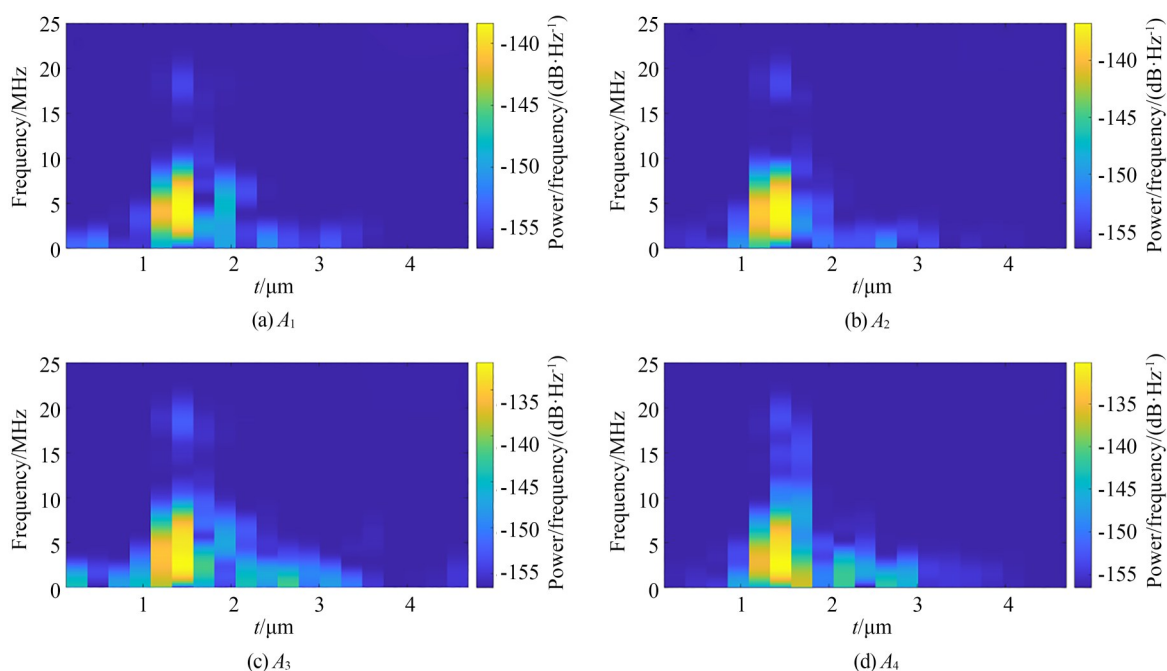


图5 Au-PDMS复合材料薄膜样本超声波频谱

Fig. 5 Spectrograms of Au-PDMS nanocomposite film samples with concentrations

4组信号分析结果如图6所示。首先,如图6(a)所示,Sig2主频为4.58 MHz,高于其他两组,和Sig1基本持平。高主频有助于提升检测分辨率,使得对钢筋微裂纹识别更加精确。其次,如图6(b)所示,Sig2带宽为4.18 MHz,能量分布较宽,有利于增强时域分辨率,提升对回波细节捕捉能力。峰峰值方面,如图6(c)所示,sig2处于较高水平。信噪比方面,如图6(d)所示,Sig2为19.56 dB,虽然略低于Sig1与Sig4,但远高于Sig3,其信号噪声干扰较小,保证检测可靠性和

准确性。综合上述分析,Sig2兼顾高分辨率和高信噪比需求,作为钢筋无损检测超声信号。由波长公式:

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (16)$$

其中: c 是超声波在介质中的传播速度。如图7所示,HRB400钢筋是热轧带肋钢筋,其主要成分是钢,钢中的纵波声速 c 大约在5900 m/s。单周期脉冲、无噪声情况下最小可分辨距离为:

$$\Delta R_{\min} = \frac{\lambda}{2}. \quad (17)$$

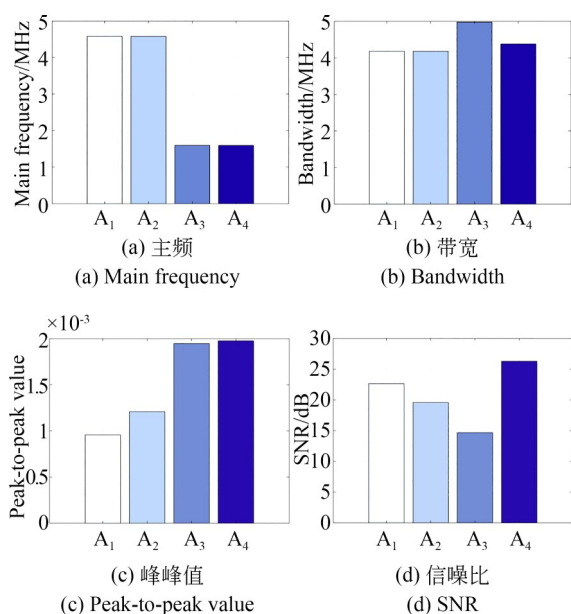


图6 信号参数对比

Fig. 6 Comparison of signal parameters

如图4可知,时域信号脉宽为 $12 \mu\text{s}$,可得距离分辨率为:

$$\Delta R = \frac{c \cdot \tau}{2}. \quad (18)$$

计算得出 $\Delta R = 640 \mu\text{m}$,即在 HRB400 钢筋中,超声信号距离分辨率约为 $640 \mu\text{m}$ 。

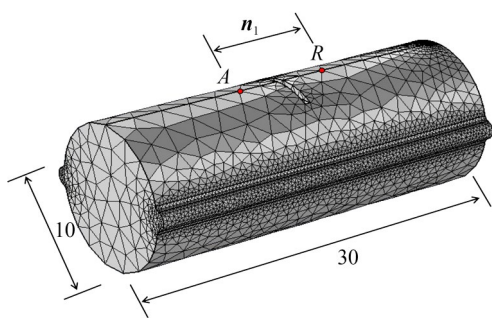


图7 HRB400钢筋模型

Fig. 7 HRB400 steel reinforcement bar model

4 超声检测裂纹数值分析

4.1 HRB400 钢筋建模

基于 HRB400 级钢筋几何条件,设计模型几何参数为直径 10 mm、长度 30 mm,利用 COMSOL Multiphysics 构建表面完好 (Intact Model, IM) 有限元模型为参照样本,含不同裂纹深度 (Cracked Models, CM1~CM7) 有限元模型 7 个样

本。设立超声激励点 (A) 与信号接收点 (R), A 位于钢筋跨中表面, R 沿纵轴方向距激励点 10 mm 处。A, R 之间跨中位置引入深度梯度 (D) 为 1~4 mm, 步长 0.5 mm 的表面裂纹, 依次编号为 CM1~CM7, 裂纹宽度保持恒定。选择钢筋模型两端设置低反射边界, 以抑制不必要的反射现象。为模拟 HRB400 钢筋在混凝土中实际边界条件, 模型两端采用固定约束边界条件。并依据 HRB400 钢筋的实际化学成分和力学性能参数进行建模, 如表 2~表 3 所示, 以确保仿真结果的可靠性。

表2 样本裂纹深度

Tab. 2 Crack depth of models

样本	IM	CM1	CM2	CM3	CM4	CM5	CM6	CM7
D/mm	0	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4

表3 HRB400 钢筋的机械性能

Tab. 3 Mechanical properties of HRB400 rebar

屈服强度/ MPa	极限强度/ MPa	杨氏模量/ GPa	伸长率/ %
472	632	210	23

4.2 时频分析

R 处接收不同裂纹深度时域振幅如图 8 所示。IM 信号呈现单峰平稳特性, 峰值为 $5.2 \mu\text{s}$, 幅值为 $0.8 \times 10^{-4} \text{ mm}$; CM1~CM3 样本主峰幅值增至 $1.2 \times 10^{-4} \text{ mm}$, 在裂纹 1 mm 时达峰值, 波形展宽至 6~9 μs 并在 8 μs 处出现 $0.3 \times 10^{-4} \text{ mm}$ 次级振荡峰, 表明裂纹界面反射波与直达波叠加干涉。CM4~CM6 中深裂纹导致通道主峰衰减至 $0.6 \times 10^{-4} \text{ mm}$, 波形分裂为双峰结构, 5.8 μs 与 7.3 μs 双峰间隔 1.5 μs , 对应绕行裂纹两侧路径差为 $\Delta L \approx 8.9 \text{ mm}$ 。CM7 深层裂纹超声表现在 7~10 μs 区间多峰弥散幅值标准差增至 $0.18 \times 10^{-4} \text{ mm}$, 反映多路径散射混叠效应。

通过短时傅里叶变换分析 HRB400 钢筋中超声传播时频特性, 发现裂纹深度显著影响信号能量分布, 如图 9 所示。IM 样本信号能量集中在 1~2 MHz 频段, 强度约为 -75 dB, 时间窗口为 5~10 μs 。裂纹样本表现出三类特征变化: 浅裂纹深度为 1~2 mm, 高频成分 3~4 MHz 能量增强, 其中 1.5 mm 裂纹在 2.8 MHz 处出现特征峰,

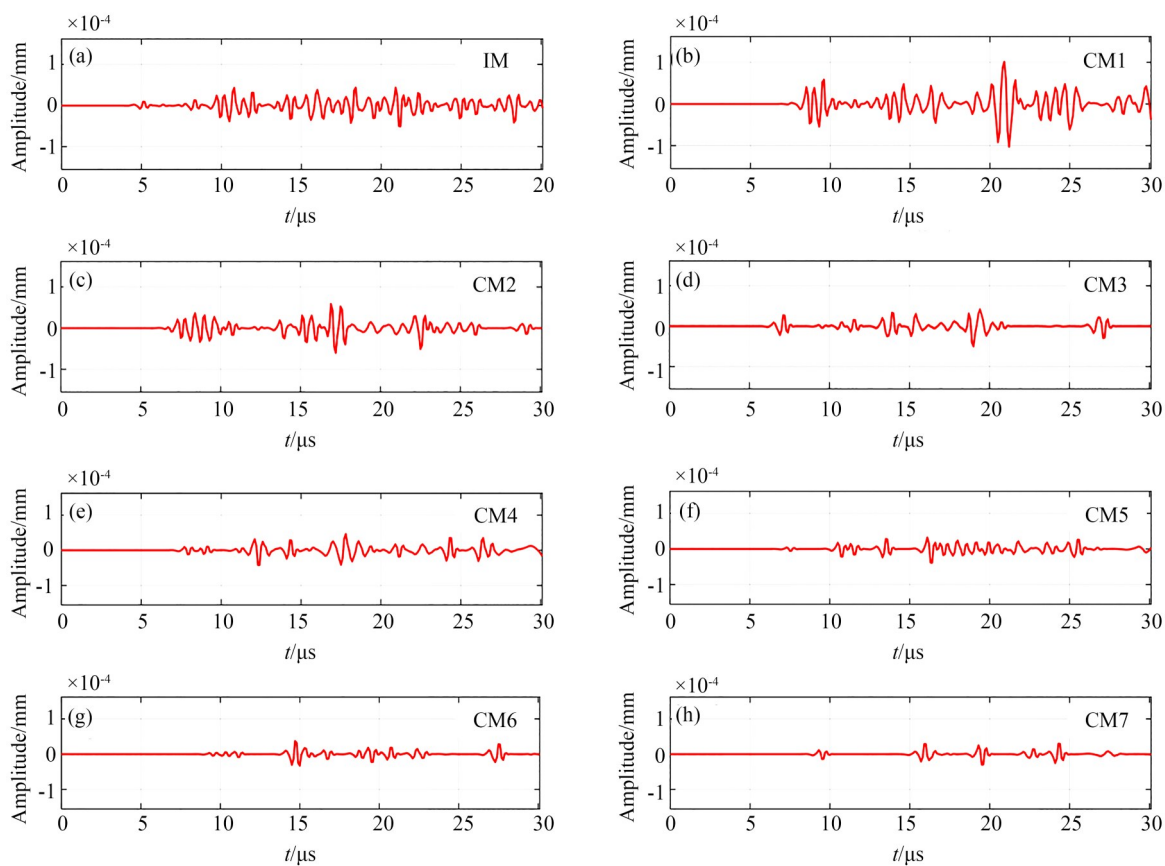
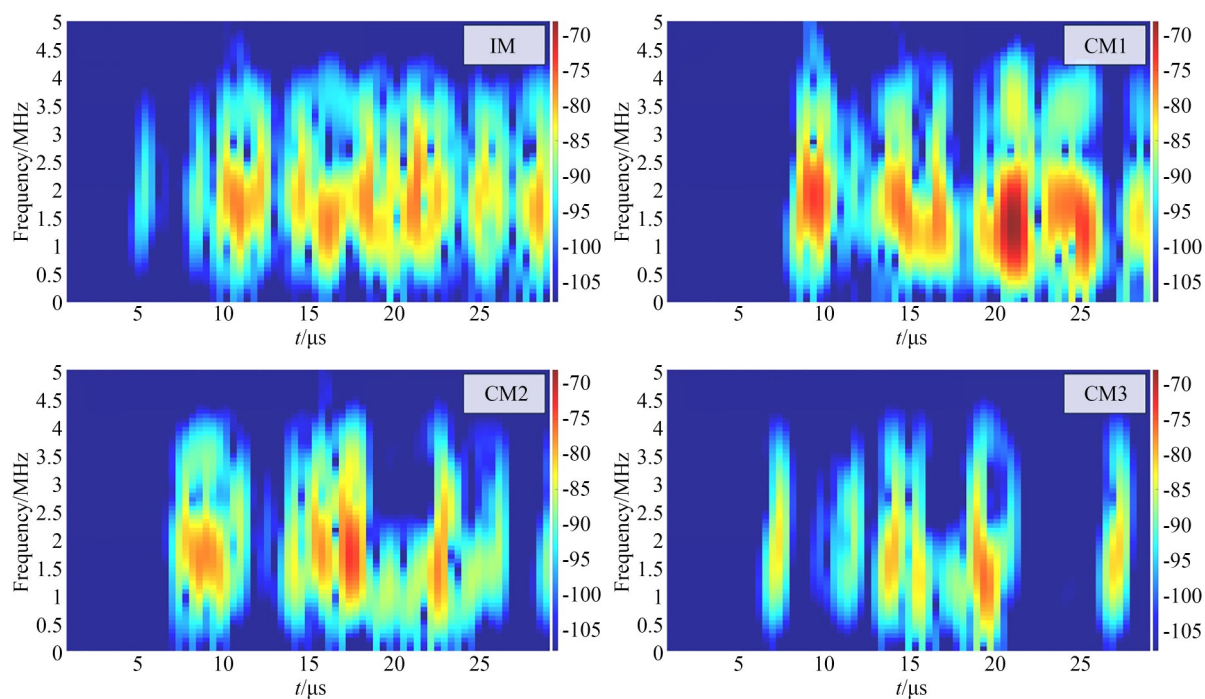


图8 模型超声波时域振幅

Fig. 8 Ultrasonic waves time domain amplitudes of models



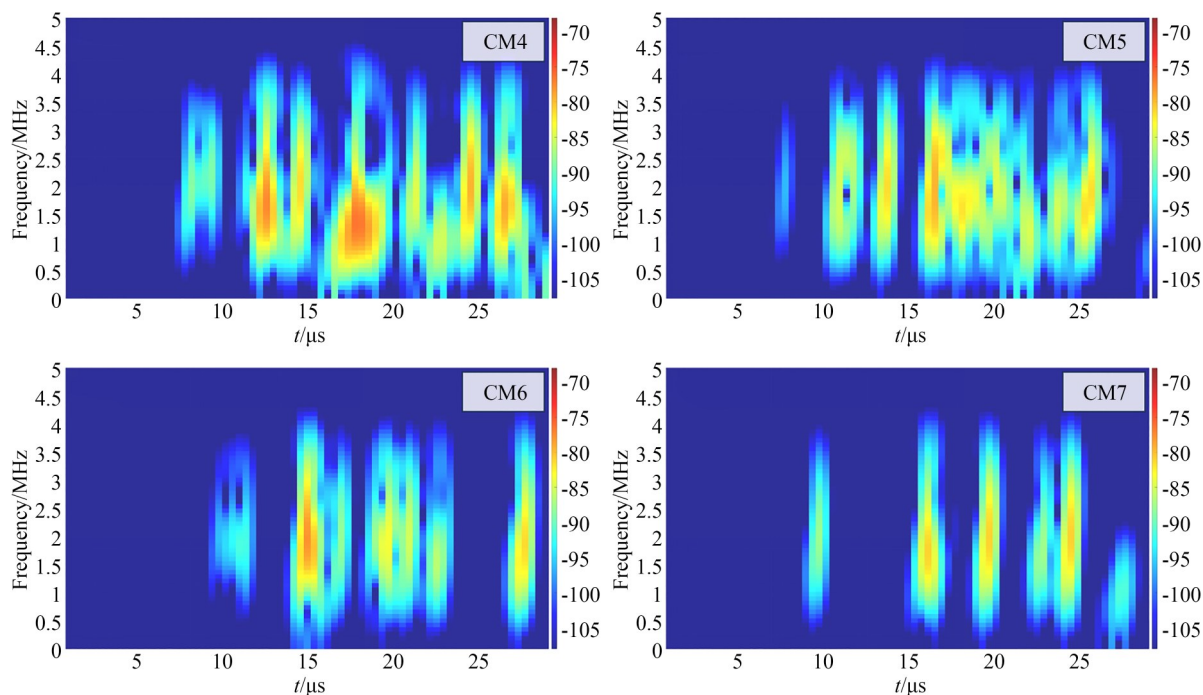


图9 模型超声波频谱振幅

Fig. 9 Spectral amplitude of models

强度达到 -80 dB, 较基准工况提升 10 dB; 中等裂纹深度为 $2.5 \sim 3$ mm 时, 主能量带向 $1 \sim 2.5$ MHz 低频迁移; 深裂纹深度为 $3.5 \sim 4$ mm 时, 时域能量呈现弥散化特征, 4 mm 裂纹在 $20 \mu\text{s}$ 后出现间隔约 0.8 MHz 多峰干涉现象。说明浅裂纹通过局部共振增强特定高频成分, 而深裂纹因多路径衍射形成频散特征。

由此可得, 当超声信号通过裂纹, 其中心频率发生改变, 裂纹越深, 中心频率越低。利用中心频率量化裂纹深度建立数学模型, 拟合三次多项式(19)所示, 其确定系数 $R^2=0.98033$ 。

$$y = 0.009293x^3 \pm 0.056104x^2 + 0.009105x + 1.851181. \quad (19)$$

4.3 多参数协同响应机制

超声波在裂纹扩展过程中信号特征呈现多参数协同演化规律。峰值幅度、信号能量、主频率和到达时间与裂纹深度关联性可系统归纳如下。

4.3.1 峰值幅度

峰值幅度呈现先升后降非单调变化趋势, 其变化规律与裂纹深度引起波场相互作用密切相

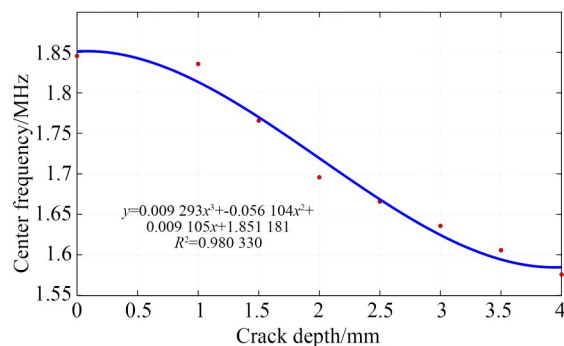


图10 中心频率-裂纹深度拟合曲线

Fig. 10 Centre frequency-crack depth fitting curve

关。如图10所示, 在 $0 \sim 1$ mm 裂纹初始阶段, 微裂纹形成局部阻抗失配界面, 反射信号与入射波在界面处发生同相位叠加, 导致幅度从 8.2×10^{-5} mm 上升至峰值 12.0×10^{-5} mm。当裂纹深度超过临界阈值时, 超声波在裂纹区域的散射效应增强, 能量因多路径传播和几何扩散作用发生非线性耗散, 幅度衰减至 4.5×10^{-5} mm。这一现象表明, 裂纹深度 1 mm 为反射主导与散射主导机制临界转折点, 即当裂纹深度接近 $\lambda/4$ 时反射增强, 深度 $> \lambda/2$ 时散射主导。

如图11所示, x 轴为裂纹深度, y 轴为峰值幅

度。建立峰值幅度与裂纹深度的数学模型如式(20),确定系数 $R^2=0.73043$ 。

$$y = 6.3083e^{-06}x^3 - 4.1708e^{-05}x^2 + 6.1123e^{-05}x + 5.5098e^{-05}. \quad (20)$$

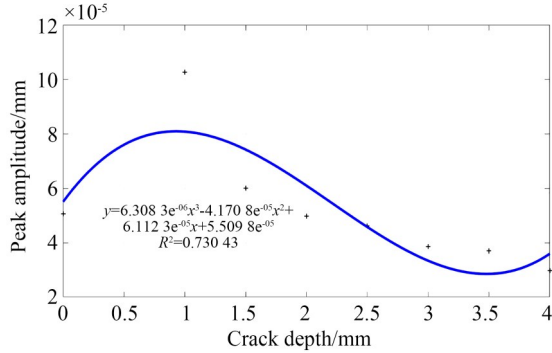


图 11 峰值幅度与裂纹深度的数学模型

Fig. 11 Relationship between peak amplitude and crack depth

4.3.2 信号能量

信号能量随裂纹深度的变化呈现单峰曲线特征,在裂纹深度为1 mm时达到极值 1.6×10^{-7} mJ。其演化过程可分为两个显著阶段:0~1 mm阶段,能量以指数形式快速增长,主要源于裂纹开口谐振效应在深度1 mm处满足 $\lambda/4$ 波长条件,反射波与入射波相位叠加形成驻波共振,导致能量集中释放。1~4 mm阶段,能量呈现分段线性下降,1~2 mm段陡降,2~4 mm段衰减速率减缓。其物理机制归结为当裂纹深度超过1 mm后,谐振条件被破坏,纵波、横波与表面波干涉作用增强,能量通过瑞利波散射向各向同性空间耗散;同时,裂纹开口形貌随深度增加趋于稳定,散射路径空间分布差异减小,导致能量下降速率逐渐趋缓。

如图12所示, x 轴为裂纹深度, y 轴为信号能量,建立信号能量与裂纹深度的数学模型如式(21),确定系数 $R^2=0.66978$ 。

$$y = 1.1395e^{-8}x^3 - 7.072e^{-08}x^2 + 8.7349e^{-08}x + 7.5088e^{-08}. \quad (21)$$

4.3.3 主频率

主频率随裂纹深度演化呈现三阶段特征。在裂纹初始扩展0~2 mm阶段,主频率从1.80 MHz持续降至1.32 MHz,其原因是浅裂纹对超

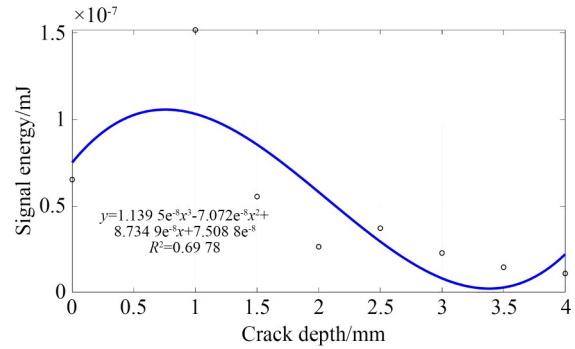


图 12 信号能量与裂纹深度的数学模型

Fig. 12 Relationship between signal energy and crack depth

声波绕射效应占主导地位,低频成分因绕射路径延长而选择性增强。当裂纹深度进入2~3 mm时,主频率出现回升至1.65 MHz,这是由于裂纹深度接近超声波波长时,高频反射波在裂纹界面处相位匹配条件被激活,声阻抗比 $Z_2/Z_1=1.25$,导致高频成分通过镜面反射机制被选择性保留。进一步增加裂纹深度至3~4 mm时,主频率稳定在 (1.63 ± 0.05) MHz区间,表明此时裂纹深度远超超声波波长,波场相互作用由几何散射主导。

如图13所示, x 轴为裂纹深度, y 轴为主频率,建立主频率与裂纹深度的数学模型如式(22),确定系数 $R^2=0.70546$ 。

$$y = 0.016195x^3 - 0.02541x^2 - 0.096001x + 1.6163. \quad (22)$$

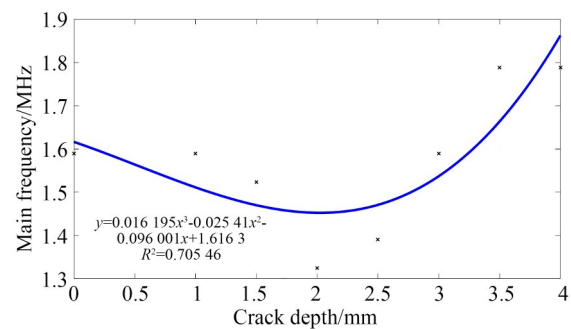


图 13 主频率与裂纹深度的数学模型

Fig. 13 Relationship between main frequency and crack depth

4.3.4 触达时间

信号触达时间随裂纹深度增加呈现总体上升伴随局部震荡非线性特征。无裂纹状态下基

线到达时间为 $6.2\ \mu\text{s}$, 当裂纹深度扩展至 $3\ \text{mm}$ 时, 时间增至 $11.8\ \mu\text{s}$, 并在 $1.5\ \text{mm}$ 与 $2.5\ \text{mm}$ 处分别出现 $\pm 0.8\ \mu\text{s}$ 局部偏差。此阶段时延总体上升主要源于超声波绕行裂纹声程增长。当裂纹深度进一步增至 $3\sim 4\ \text{mm}$ 时, 到达时间回落至 $9.4\ \mu\text{s}$, 其机理归因于裂纹分叉与次级微裂纹的形成改变波传播主路径, 同时应力集中区塑性变形导致材料局部密度 ρ 上升, 部分抵消声速下降效应。

如图 14 所示, x 轴为裂纹深度, y 轴为到达时间, 建立到达时间与裂纹深度的数学模型如式 (23), 确定系数 $R^2=0.716\ 68$ 。

$$y = 0.251\ 57x^3 - 1.526x^2 + 3.161\ 9x + 5.148\ 8. \quad (23)$$

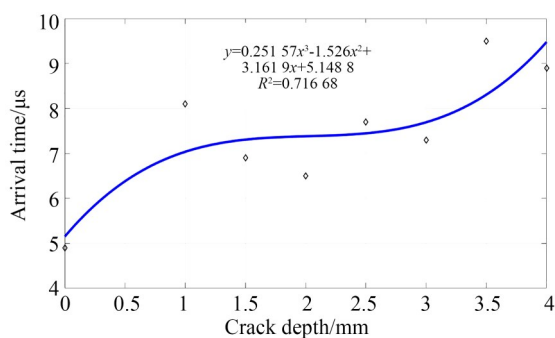


图 14 到达时间与裂纹深度的数学模型

Fig. 14 Relationship between arrival time and crack depth

5 结 论

本文针对高铁轨枕 HRB400 钢筋微裂纹检测难题, 开发基于金纳米复合材料光声传感检测方法。研究了金纳米复合材料光声信号转化效

能并分析钢筋几何表面超声传播特性。通过制备 $4.01\text{wt}\%\sim 7.69\text{wt}\%$ 浓度梯度薄膜样品, 利用光声效应对不同浓度金纳米复合材料光声转换机理进行分析。通过融合巴特沃斯带通滤波与 db4 小波分解复合去噪算法对样本超声信号进行处理与对比分析。本方法验证 $5.23\text{wt}\%$ 样本超声信号主频达 $4.58\ \text{MHz}$ 、信噪比为 $19.56\ \text{dB}$, 实际裂纹检测精度为 $640\ \mu\text{m}$ 。利用 COMSOL Multiphysics 构建钢筋几何模型, 对不同裂纹深度下超声信号数据进行时频分析, 利用中心频率量化裂纹深建立数学模型, 其确定系数 $R^2=0.980\ 33$ 。对超声信号多参数协同响应机制定量分析, 结果表明: 当裂纹深度为 $1\ \text{mm}$ 时, 超声首波幅值提升; 深度增至 $3\ \text{mm}$ 时, 时域波形分裂为双峰结构, 峰间隔达 $1.5\ \mu\text{s}$ 。

该方法通过建立裂纹深度与峰值幅度、能量、主频率及到达时间数学模型, 实现多维度特征钢筋裂纹深度协同诊断, 满足高铁基础设施对微米级分辨率、强抗干扰性及复杂环境适应性的要求, 为铁路钢筋混凝土结构健康监测提供可靠技术支撑。

作者贡献声明:

孙雨梦: 测量与仿真实验实施, 论文构思与撰写;

孙子惠: 实验数据整理及分析;

杜聪: 测量方法的提出及获取资助;

陈志刚: 论文指导和编辑及提供部分实验仪器;

孙殷楠: 提供研究材料及部分数据可视化呈现。

参考文献:

- [1] ASKARZADEH T, BRIDGELALL R, TOLLIVER D D. Systematic literature review of drone utility in railway condition monitoring [J]. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 2023, 149(6): 04023041.
- [2] SHABLIY O, BORSUK Y. Geologic aspects of railway passenger transportation in Ukraine [J]. *Human Geography Journal*, 2021(31): 37-46.
- [3] CHEN J F, MEI M. Numerical analysis of low-cost recognition of tunnel cracks with compressive sensing along the railway [J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(24): 13007.
- [4] YU F, CHEN M Z, ZHOU M, et al. Study on corrosion characteristics of steel rebars and corrosion-induced cracks in reinforced concrete by employing X-ray microcomputed tomography [J]. *Journal of Building Engineering*, 2025, 100: 111738.
- [5] KOBAYASHI C, NISHIWAKI T, TANABE T, et al. Non-destructive testing of reinforced concrete structures using sub-terahertz reflected waves [J]. *Developments in the Built Environment*, 2024, 18: 100423.
- [6] ELSEICY A, ALONSO-DÍAZ A, SOLLA M, et

- al. Combined use of GPR and other NDTs for road pavement assessment: an overview [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(17): 4336.
- [7] KUCHIPUDI S T, GHOSH D, GANGULI A. Imaging-based detection and classification of corrosion damages in reinforced concrete using ultrasonic shear waves[J]. *Journal of Building Engineering*, 2025, 105: 112490.
- [8] SUN Z H, XIA Y M. Study on structural health monitoring and damage detection in the field of civil engineering[J]. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 2022, 10: 92-98.
- [9] WANG X H, ZHU Z J, GUO G Q, et al. Thin copper plate defect detection based on lamb wave generated by pulsed laser in combination with laser heterodyne interference technique [J]. *Sensors*, 2024, 24(10): 3103.
- [10] WANG X H, GONG Y, ZHU Z J, et al. Enhanced analysis of H62 brass thin plates using integrated LIBS and laser ultrasonic Lamb wave for composition and flaw detection[J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 185: 112525.
- [11] OTTOSEN L M, KUNTHER W, INGEMANN-NIELSEN T, et al. Non-destructive testing for documenting properties of structural concrete for reuse in new buildings: a review [J]. *Materials*, 2024, 17(15): 3814.
- [12] KOWALCZYK J, JÓSKO M, WIECZOREK D, et al. The influence of the hardness of the tested material and the surface preparation method on the results of ultrasonic testing [J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(17): 9904.
- [13] ERDOGMUS E, GARCIA E, AMIRI A S, et al. A novel structural health monitoring method for reinforced concrete bridge decks using ultrasonic guided waves[J]. *Infrastructures*, 2020, 5(6): 49.
- [14] BAO X Y. Prospects on ultrasound measurement techniques with optical fibers[J]. *Measurement Science and Technology*, 2023, 34(5): 051001.
- [15] CONCILIO A, CIMINELLO M, GALASSO B, et al. De-bonding numerical characterization and detection in aeronautic multi-element spars [J]. *Sensors*, 2022, 22(11): 4152.
- [16] DANG D Z, WANG Y W, NI Y Q. Nonlinear autoregression-based non-destructive evaluation approach for railway tracks using an ultrasonic fiber Bragg grating array[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 411: 134728.
- [17] CHEN E, LI Y X, ZHANG S S. Quantitative monitoring of localized pitting corrosion in steel bars through a combined use of distributed optical fiber sensors and finite element analyses [J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 438: 136970.
- [18] TANG Q X, DU C, WANG X W, et al. Temperature and crack detection of steel rods using an all-optical photoacoustic ultrasound system[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 262: 119537.
- [19] DU C, WANG Y X, XU L T, et al. Fiber optic photoacoustic-based steering imaging transducer [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2022, 34(8): 428-431.
- [20] DU C, LI S M, ZHOU J C, et al. Miniature all-optical angle-focused photoacoustic transducer[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(1): 27-30.
- [21] DU C, SUN Z H, WANG Y X, et al. Micro mechanism research of photoacoustic effect based on gold nanocomposites in multiphysics field [J]. *IEEE Access*, 2024, 13: 73285-73296.
- [22] RAYLEIGH L. On waves propagated along the plane surface of an elastic solid[J]. *Proceedings of the London Mathematical Society*, 1885, s1-17(1): 4-11.

作者简介:



孙雨梦(2001—),男,硕士研究生,2024年于天津商业大学获得工学学士学位,主要从事光纤传感器无损检测方面的研究。E-mail: 2108020024030@stu.bucea.edu.cn

通讯作者:



杜聪(1988—),男,博士,副教授,2020年于美国马萨诸塞大学电气与计算机工程系获得博士学位,主要从事超声和信号处理、光纤传感器、故障诊断和无损检测方面的研究。E-mail: ducong@bucea.edu.cn